

VILJAN REAALIAIKAISEN MASSAVIRTAUKSEN MÄÄRITTÄMI- NEN ELEVAATTORIN VIRRANKULUTUKSEN PERUSTEELLA

Alexi Järvenpää
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Agroteknologia
2019

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Aleksi Järvenpää			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Viljan reaaliaikaisen massavirtauksen määrittäminen elevaattorin virrankulutuksen perusteella			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agroteknologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma		Aika — Datum — Month and year Huhtikuu 2019	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages s. 41
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>Työn tavoitteena oli suunnitella, rakentaa ja testata elevaattorin massavirtausta mittaavaa laitteistoa, joka pystyy laskemaan massavirtauksen tietyllä ajanhetkellä ja elevaattorin läpi kokonaisuudessaan kulkeneen viljan massan elevaattorin virrankulutuksen perusteella.</p> <p>Mittalaitteisto suunniteltiin ja rakennettiin Arduino Unon pohjalta. Arduinon valinta mikrokontrolleriksi perustui edulliseen hintaan, helppoon ohjelmoitavuuteen ja helposti liitettävien lisälaitteiden saatavuuteen. Mittalaitteisto rakennettiin pölyltä suojattuun koteloon ja se koostui Arduino Unosta, näytöstä, muistikortinlukijasta, ulkoisesta jännitelähteestä ja virtapihdeistä. Mittalaitteistosta rakennettiin helposti kuljetettava ja asennettava. Helppoon asennettavuuteen päästiin käyttämällä virranmittaukseen virtapihtejä.</p> <p>Mittalaitteistoa testattiin Viikin opetus- ja tutkimustilan kuivurilla, jossa siirrettiin ajoneuvovaa’alla punnittuja koe-eriä silosta toiseen. Mittalaitteistolle luotiin massavirtaukselle mitattujen keskiarvosuhteiden ja -virrankulutusten perusteella funktio, joka näyttää massavirtauksen reaaliajassa elevaattorin sähkömoottorin virrankulutuksen perusteella. Lopullisessa siirtokokeessa massavirtauksen funktion suhteellinen tarkkuus vaihteli 0 - 8,4 % välillä. Tarkimmillaan mittalaitteisto oli lähestyttäessä elevaattorin suurinta siirtotehoa (13,99 kg/s), jolloin tarkkuus oli jo alle 1 %. Pienillä siirtotehoilla (6,00 - 7,04 kg/s) tarkkuus oli huonoimmillaan 8,4 %.</p> <p>Tulevaisuudessa tätä parempaan tulokseen päästäisiin todennäköisesti muodostamalla massavirtauksen funktio sähkömoottorin pätötehon avulla ja tehostamalla mittalaitteiston kalibrointiprosessia. Työssä kehitetty mittalaitteisto soveltuu mahdollisesti edulliseksi kuivurivaa’aksi ja myös viljankuivausprosessin kiertonopeuden optimointiin.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Massavirta, arduino, elevaattori, virranmittaus			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Työtä ohjasivat Tapani Jokiniemi ja Laura Alakukku			

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Aleksi Järvenpää			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Determining real-time grain mass flow based on the current consumption of an elevator			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agrotechnology			
Työn laji — Arbetets art — Level Master's thesis		Aika — Datum — Month and year April 2019	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages p. 41
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>The aim of this work was to design, build and test an elevator mass flow measuring equipment that can calculate the mass flow at a given time and the mass of the grain that has been moved through the elevator on the basis of the current consumption of the electric motor of the elevator.</p> <p>The measuring equipment was designed and built based on the Arduino Uno microcontroller board. The choice of Arduino as a microcontroller was based on affordable price, easy programmability and the availability of easy-to-connect accessories. The measurement equipment was built in a dust-proof case and consisted of an Arduino Uno, display, memory card reader, external power supply and a current clamp. The measuring equipment was designed to be easily installed and transported. Easy installation was achieved by using a current clamp for current measurement.</p> <p>The measuring equipment was tested with a grain elevator at Viikki Research Farm, where weighed grain samples were transferred from one silo to another. A function was created for the measuring equipment on the basis of the average grain flow rates and current consumption, which shows the mass flow in real time based on the current consumption of the elevator electric motor. In the final transfer experiment, the relative accuracy of the mass flow function ranged from 0 % to 8.4 %. The measuring equipment achieved its highest accuracy, below 1 %, at high grain mass flow levels (13,99 kg/s), where the mass flow was close to the maximum of the elevator. At low transfer rates (6,00 - 7,04 kg/s), the accuracy was poorest at 8,4 %.</p> <p>In the future, better results would probably be achieved by forming a mass flow function with the effective power measurement of the electric motor and by improving the calibration process of the measuring equipment. The developed measuring equipment is possibly suitable as a simple grain weighing solution and also for optimizing the recirculating speed of grain drying process.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Mass flow, arduino, elevator, current measurement			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Supervisors: Tapani Jokiniemi and Laura Alakukku			

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	5
2 KIRJALLISUUS	7
2.1 Elevaattori	7
2.1.1 Elevaattorin tehonkulutus	8
2.1.2 Elevaattorin hyötysuhde	10
2.2 Sähkömoottorit	10
2.2.1 Sähkömoottorityypit	10
2.2.2 Sähkömoottorin tehonkulutus	10
2.2.3 Moottorin hyötysuhde	12
2.3 Virranmittaus	13
2.3.1 Ohmin laki	13
2.3.2 Virranmuunnin	14
2.4 Viljan punnitusmenetelmiä kuivurissa	15
2.5 Arduino Uno mittausinstrumenttina	16
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	18
4 AINEISTO JA MENETELMÄT	19
4.1 Viikin opetus- ja tutkimustilan viljankuivaamo	19
4.1.1 Koejärjestely	19
4.1.2 Elevaattorin ominaisuudet	22
4.2 Virtapihdit	23
4.3 Mittalaitteisto	24
4.4 Arduinon ohjelmointi	26
4.6 Tutkimuksessa tehdyt kokeet	29
5 TULOKSET	30
5.1 Mittalaitteiston näytteenottotaajuus ja sisäinen tarkkuus	30
5.2 Koemittaus kuivurilla 17.10.2018	30
5.3 Koemittaukset kuivurilla 7.-8.11.2018	32
6 TULOSTEN TARKASTELU	35
6.1 Mittalaitteiston sisäinen ja ulkoinen tarkkuus	35
6.2 Mittausten virhetekijät	35
6.3 Mittalaitteiston käytettävyys kuivurilla	36
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	38
8 KIITOKSET	39
LÄHTEET	40

1 JOHDANTO

Nykyaikaisella kuivurilla viljaa kuivataan ja siirretään suuria määriä kuivurista siiloon ja edelleen siilosta eteenpäin esim. lajiteltavaksi tai pidempiaikaiseen säilytykseen. Viljaerien punnitseminen on entistä suuremmassa roolissa, jotta tiedetään, miten paljon viljaa on kuivattu tai miten paljon viljaa on myytäväksi tai omaan käyttöön. Viljamassojen punnitsemiseen käytetään yleisesti kuivurin tai siilon alle asennettavia vaakantureita, jotka kertovat hyvinkin tarkasti kuivurissa tai siilossa sijaitsevan viljan painon (Utilcell 2018). Tällaiset anturit ovat olleet suosittuja rakennettaessa uusia kuivureita, jolloin niiden asentaminen on kaikkein helpointa, joskin niiden hinta on vielä melko kallis. Vanhempiin kuivureihin antureita on vaikeampi asentaa, sillä siilot tai kuivuri jouduttaisiin nostamaan hetkellisesti ylös tukijaloiltaan, jotta anturi saadaan sijoitettua tukijalkojen ja siilon tai kuivurin väliin (Utilcell 2018).

Kuivurilla energiankulutuksen vähentäminen on myös noussut merkittäväksi tekijäksi ja on tehty useita tutkimuksia liittyen viljankuivauksen energiatehokkuuteen (Jokiniemi 2014). Etenkin kuivausprosessia säättämällä olisi mahdollista saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä (Jokiniemi 2014). Peltolan (1997) mukaan viljan kierrätyksen massavirtauksen vaikutus kuivauksen tehoon ja energiatehokkuuteen on selkeä. Peltolan (1997) tekemissä kuivauskokeissa viljan massavirtauksen säädöillä on mahdollista optimoida kuivaustapahtumaa, mutta massavirtauksen määrittäminen oli ongelmallista.

Tässä työssä tarkoituksena on kehittää, rakentaa ja testata uutta menetelmää viljan punnitsemiseen kuivuriolosuhteissa. Uudella menetelmällä pyritään mittaamaan elevaattorin läpi kulkevaa massavirtaa. Toimiessaan menetelmää pystyisi käyttämään yksinkertaisena vaakana siirrettäessä viljaa kuivurilla, sekä kuivausprosessin optimoinnin apuna, säättämällä viljan kiertonopeutta massavirtausmittausten perusteella. Tutkimus on osa Helsingin yliopiston: Viljan kuivauksen energiatehokkaat teknologiat – VILKUTEK -hanketta. Marjatta ja Eino Kollin säätiö rahoitti hanketta.

Aikaisempia tutkimuksia aiheesta ei ollut saatavilla. Lähimmät tutkimukset aiheeseen liittyen ovat DeLongin (1970) ja Vakolan (1973, 1974) suorittamat tutkimukset ja koetusselostukset viljaelevaattoreista 1970-luvulla, joiden tulosten perusteella massavirtauksen

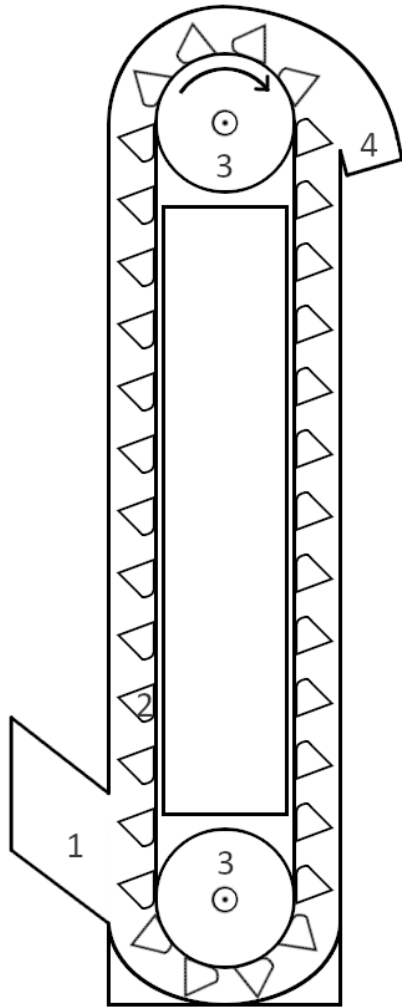
mittaus virrankulutuksen perusteella voisi olla mahdollista. Edelliset viljan massavirtausta mittaavat laitteet ovat pääosin olleet puimuriin asennettavia voima- tai muihin sensoreihin perustuvia toteutuksia (Dyna Instruments 2018, He ym. 2016). Yleisesti massavirtausta mittaavia laitteita on kehitetty jo paljon ja ne perustuvat massa-antureihin, säteilyn mittaamiseen tai laserlaitteisiin (He ym. 2016). Näiden huono puoli on se, että ne vievät tilaa ja ovat suhteellisen kalliita, johtuen yleisesti niiden vaatimasta tekniikasta. Myös niiden asentaminen ja puhtaanapito kuivuriympäristössä voisi osoittautua haastavaksi, joten erillisten massavirtauslaitteiden asennus ei liene kannattavaa.

2 KIRJALLISUUS

Kuivurin tai elevaattorin massavirtausta mittaavia laitteita ei aikaisemmasta kirjallisuudesta löytynyt. Kokonaisuudessaan massavirtausta mittaava laitteisto perustuu elevaattoriin, sähkömoottoriin, virranmittaukseen ja mikroprosessoriin. Kaikista aiheista löytyy erikseen hyvin tietoa, joten kirjallisuusosiossa on keskitytty edellä mainittuihin aiheisiin.

2.1 Elevaattori

Kuppielevaattori on yleisin käytössä oleva kuljetuslaite vapaasti virtaavien materiaalien vertikaaliseen kuljetukseen ja niitä käytetäänkin yleisesti viljankuivaamoilla viljan nostoon kuivurille ja silloihin (Srivastava 2006 ja Rosentrater ja Williams 2004). Kuppielevaattori koostuu suljettuun koteloon sijoitetusta kahdesta hihnapyörästä ja niiden ympärille kietoutuvasta hihnasta, jolle on sijoitettu tasaisin välimatkoin materiaalin nostoon soveltuvia kuppeja (Srivastava 2006 ja Labiak ja Hines 1999). Kuppien koko, sijoitteluväli ja hihnan nopeus vaihtelee riippuen halutusta kuljetuskapasiteetista. Yleisimmin maataloudessa käytössä olevien kuppielevaattorien kapasiteetit vaihtelevat välillä 7 – 350 m³/h (Srivastava 2006). Kuvassa 1 on esitetty tyypillisen elevaattorin rakennekuva.



Kuva 1. Rakennekuva tyypillisestä keskipakoisvoimalla purkavasta elevaattorista. 1. syöttöluukku, 2. nostokuppi, 3. hihnapyörä, 4. materiaalin ulostulo.

Kuppielevaattorit voidaan jakaa kahteen luokkaan: keskipakoisvoimalla purkaviin ja jatkuvasti purkaviin. Jälkimmäisessä purkavana voimana toimii painovoima ja ensimmäisessä keskipakoisvoima. Näistä kahdesta vaihtoehdosta keskipakoisvoimaan perustuva purkaminen on huomattavasti yleisempi viljan käsittelyssä (Labiak ja Hines 1999). Kuppielevaattorien suosio viljankäsittelyssä perustuu niiden hyvään hyötysuhteeseen (n. 90%) (Srivastava 2006) ja alhaiseen tehonkulutukseen verrattuna muihin kuljetusvaihtoehtoihin, kuten pneumaattiseen tai ruuvikuljetukseen (Labiak ja Hines 1999).

2.1.1 Elevaattorin tehonkulutus

Kuppielevaattorin toiminta voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: kupin täyttö elevaattorin pohjalla, materiaalin nosto ja kupin tyhjennys elevaattorin huipulla (Jaskulski 2008). Tämän toiminnan vaatima kokonaisteho voidaan jakaa sen tehoa vaativiin komponentteihin: materiaalin nosto, materiaalin kaapiminen kuppiin, materiaalin ulosheitto, ilmanvastus putkistossa, laakerien ja voimansiirron kitkat ja materiaalin takaisinkulkeutuminen (Srivastava 2006, DeLong 1970 ja Jaskulski 2008). Elevaattorin vaatima teoreettinen teho voidaan laskea kaavalla 1 (Srivastava 2006). Huomioitavaa on, että jos elevaattoriin syötetään materiaalia hihnan paluupuolelta, materiaalin kaapimiseen vaadittu voima kasvaa hieman ja kuppien täyttöaste on heikompi (DeLong 1970). Tästä syystä elevaattorin nostoteho on aina heikompi syötettäessä materiaalia paluupuolelta. Vakolan (1973, 1974) suorittamissa elevaattorikokeissa Antti 36- ja Jaakko 70-viljaelevaattoreille havaittiin myös nostotehon ja hyötysuhteen olevan n. 5 % heikompia syötettäessä viljaa elevaattorin paluupuolelta.

$$P = \rho_b g Q h, \quad (1)$$

jossa

P = teoreettinen teho, W

ρ_b = materiaalin irtotiheys, kg/m³

g = normaaliputoamiskiihtyvyys, m/s²

Q = elevaattorin kapasiteetti, m³/s

h = materiaalin nostokorkeus, m

Kaavaa 1 voisi käyttää elevaattorien valmistajien usein ilmoittamalla tn/h arvolla. Tällöin ρ_b ja Q korvataan tn/h arvolla, joka täytyy muuntaa kg/s muotoon jakamalla se 3,6:lla. Kaava 1 antaa kuitenkin ainoastaan materiaalin nostoon vaaditun tehon, joten käytännössä vaadittu teho on aina hieman suurempi.

DeLongin vuonna 1970 suorittamassa tutkimuksessa vertailtiin elevaattorin tehonkulutuksia eri kasvilajeilla ja hihnan nopeuksilla. Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella elevaattorin nostotehon ja tehonkulutuksen suhde oli melko lineaarinen, kuten kaavan 1 perusteella on odotettavissakin. Myös Vakolan (1973, 1974) tekemissä elevaattorikokeissa sekä Antti 36-, että Jaakko 70-viljaelevaattoreiden nostoteho ja sähköteho korreloivat lineaarisesti.

2.1.2 Elevaattorin hyötysuhde

Kuppelevaattorien hyötysuhde on yleisesti ottaen hyvä, sillä teoreettista tehoa täytyy kasvattaa vain n. 10 – 15 %, jolloin otetaan huomioon muut edellä mainitut tehoa kuluttavat komponentit ja saadaan elevaattorin todellisuudessa kuluttama akseliteho (Srivastava 2006). Elevaattorin akselin ja moottorin välissä on myös nopeuden vähentäjä, joka voi olla toteutettu hihnalla tai suoraan moottoriin kytketyllä vaihteistolla. Nopeuden vähentäjän hyötysuhde on usein 85 – 95 % (Rosentrater ja Williams 2004). Antti-Teollisuus tarjoaa elevaattoreihin kumpaakin vaihtoehtoa. Vaihdemoottorilla toteutettu ratkaisu on käytössä moottoriteholtaan tehokkaammissa (3 – 15 kW) ja hihnavetoinen ratkaisu pienempitehoisissa (1,5 – 7,5 kW) elevaattoreissa (Antti-Teollisuus 2018). Antti-Teollisuuden E-elevaattoreissa käytetään Nord Gear Oy:n vaihdemoottoripakettia (Antti-Teollisuus 2018), jonka nopeuden vähentäjän hyötysuhteen kerrotaan olevan yleisesti n. 96 % (Nord Gear Oy 2018).

2.2 Sähkömoottorit

Viljaelevaattoreissa voimanlähteenä käytetään nykyisin yksinomaan sähköiseen induktioon perustuvia kolmivaihesähkömoottoreita. Sähkömoottoreiden etuja ovat: edullisuus, edulliset käyttökustannukset, pitkäikäisyys, hyvä hyötysuhde, automatisointi, ylikuormituksen kestävyys ja kykenevä käynnistymään kuormituksen alla (Gustafson ja Morgan 2004). Tässä työssä keskitytään ainoastaan elevaattoreissa yleisesti käytettyihin sähkömoottoreihin.

2.2.1 Sähkömoottorityypit

Sähkömoottorityyppejä on useita erilaisia, mutta elevaattorikäytössä käytetään yleisesti vaihtovirtaa käyttäviä kolmivaiheisia oikosulkumoottoreita (Antti-Teollisuus 2018), jotka luokitellaan epätahtimoottoreiksi (WEG 2016). Näille moottoreille on määritelty erilaisia suunnitteluperusteita, jotka vaikuttavat lähinnä moottorin vääntöominaisuuksiin. Erilaisilla suunnitteluvaihtoehdoilla voidaan vaikuttaa esimerkiksi moottorin viemään virtaan ja vääntömomenttiin käynnistyksessä.

2.2.2 Sähkömoottorin tehonkulutus

Vaihtosähköpiireissä pätöteho voidaan laskea kaavalla 2 (Gustafson ja Morgan 2004). Jos piirissä on kapasitanssia tai induktanssia, jännitteen ja virran välille syntyy vaihe-ero. Vaihe-ero synnyttää piiriin loistehoa, joka ei tee työtä (Gustafson ja Morgan 2004).

$$P = EI \cos \varphi, \quad (2)$$

jossa

E = jännite, V

I = virta, A

φ = vaihe-eron kulma

Kaavan 2 termiä $\cos \varphi$ kutsutaan tehokertoimeksi ja se kuvaa pätötehon ja näennäistehon suhdetta (Gustafson ja Morgan 2004). Tehokerroin voi saada arvoja välillä 0 - 1, riippuen vaihe-eron kulmasta. Vaihe-eron kulma φ saa siis arvoja väliltä $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$. Vaihe-eron kulman ollessa positiivinen on kuorma induktiivinen ja negatiivisilla kulman arvoilla kuorma on kapasitiivinen (Silvonen 2004).

Kolmivaihejärjestelmässä teholla tarkoitetaan kolmen vaiheen yhteenlaskettua tehoa ja pätöteho saadaan kertomalla yhteenlaskettu teho tehokertoimella $\cos \varphi$ (Silvonen 2004). Sähkömoottorin pätöteho voidaan laskea kaavan 3 mukaisesti (Gustafson ja Morgan 2004). Kolmivaihejärjestelmän kuorma voidaan kytkeä joko tähti- tai kolmiokytkennällä (WEG 2016). Tähtikytkennässä kaavan 3 arvot I_L ja I_p ovat samat, mutta jännite E_{L-L} on $\sqrt{3} * E_p$. Kolmiokytkennässä jännitteet E_p ja E_{L-L} ovat samat, mutta I_L on $\sqrt{3} * I_p$, kuten kaavasta 3 voidaan nähdä (Gustafson ja Morgan 2004).

$$P = 3 * E_p * I_p * \cos \varphi = \sqrt{3} * E_{L-L} * I_L * \cos \varphi, \quad (3)$$

jossa

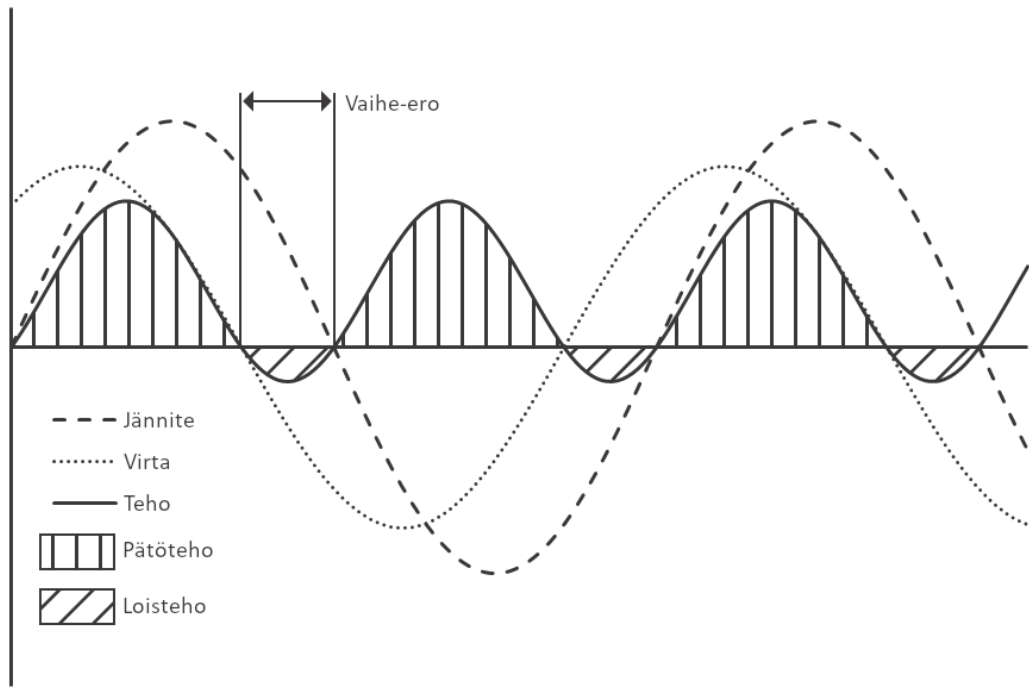
E_p = vaihejännite, V

I_p = vaihevirta, A

E_{L-L} = pääjännite, V

I_L = kuorman virta, A

Kuvassa 2 on sähköteho esitetty graafisesti jännitteen ja virran tulona. Kuvasta nähdään, että jännitteen ja virran ollessa eri vaiheessa, syntyy piiriin loistehoa.



Kuva 2. Kolmivaihejärjestelmän jännite-, virta- ja tehokäyrät. Muokattu lähteestä (Gustafson ja Morgan 2004).

2.2.3 Moottorin hyötysuhde

Sähkömoottorissa tapahtuu häviöitä, jotka huonontavat sen hyötysuhdetta. Nämä häviöt voidaan jakaa viiteen komponenttiin: staattorin resistiiviset häviöt, roottorin resistiiviset häviöt, rautahäviöt, mekaaniset häviöt ja lisähäviöt (Kueck 1998). Moottorin hyötysuhde η voidaan laskea kaavalla 4 (Bin Lu 2006).

$$\eta = 1 - \frac{W_{\text{losses}}}{P_{\text{input}}} * 100\%, \quad (4)$$

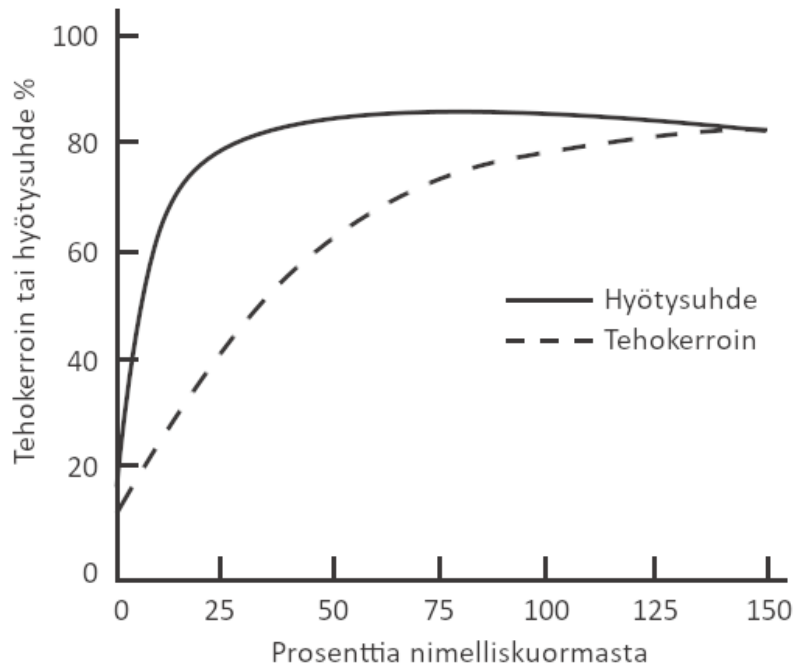
jossa

W_{losses} = moottorin yhteenlasketut häviöt (W)

P_{input} = moottoriin tuotu sähköteho (W)

Moottorin hyötysuhteen määrittämiseen on kehitetty useita keinoja, joista useimmat kuitenkin vaativat suhteellisen laajoja ja vaikeasti toteutettavia mittauksia. Helpoimmin toteutettavissa oleva määrittäminen hyötysuhteelle tapahtuu nimikyltin tiedon perusteella (Bin Lu 2006). Tässä todellisen hyötysuhteen oletetaan olevan vakio ja vastaavan nimikyltin arvoa. Virheen osuus tässä metodissa on suhteellisen suuri, jopa 10 %, sillä nimikyltin arvo voi olla epätarkka tai olosuhteet, jossa hyötysuhde on määritetty, voivat olla erilaiset

varsinaisessa käyttötilanteessa (Bin Lu 2006). Tämä metodi on parhaimmillaan, kun moottoria kuormitetaan täydellä kuormalla. Pienemmillä kuormilla hyötysuhteen arvio muuttuu epätarkaksi, sillä sähkömoottorien hyötysuhde ja tehokerroin heikentyy voimakkaasti moottorin kuorman laskiessa alle puoleen täydestä kuormasta (kuva 3) (Gustafson ja Morgan 2004).



Kuva 3. Moottorin hyötysuhde ja tehokerroin kuorman funktiona. Muokattu lähteestä (Gustafson ja Morgan 2004).

2.3 Virranmittaus

Virranmittaukseen on kehitetty useita menetelmiä, jotka voidaan jakaa eri luokkiin perustuen niiden fysikaaliseen toimintaperiaatteeseen. Nämä toimintaperiaatteet ovat: Ohmin laki, Faradayn induktiolaki, magneettikentän havaitseminen sekä Faradayn ilmiö (Ziegler ym. 2009). Näistä periaatteista yleisin virranmittauksessa hyödynnettävä on Ohmin lakiin perustuvat mittaustekniikat (Ziegler ym. 2009).

2.3.1 Ohmin laki

Yksi Ohmin lakiin perustuva ratkaisu on käyttää shunttivastusta, jonka läpi kulkeva virta on suhteellinen vastuksessa tapahtuvaan jännitehäviöön (Ziegler ym. 2009). Haittapuolena Ohmin lakiin perustuvilla virtasensoreilla on kuitenkin mitattavan virran ja virta-

mittauspiirin yhdistämä sähkökytkentä ja myös tehohäviöt mitattaessa isoja virtoja (Ziegler ym. 2009). Muita yleisiä virtasensoreita ovat esimerkiksi Rogowskin kela, virranmuunnin ja Hall-ilmiöön perustuvat sensorit. Yleisesti virtasensoreissa esiintyy eroja hinnassa, taajuusalueella, mittausalueella, tarkkuudessa, lämpöryömmimisessä, sähköeristyksessä sekä fyysisessä koossa. Tarkkuudet vaihtelevat 0.1%-10% välillä (Ziegler ym. 2009).

2.3.2 Virranmuunnin

Virranmuunnin on Faradayn induktiolakiin perustuva muunnin, joka koostuu monesta toisiokierroksesta, yhdestä ensiökierroksesta ja ydinmateriaalista, jolla on korkea suhteellinen permeabiliteetti (Ziegler ym. 2009). Toisiokierrosten määrä riippuu halutusta muuntosuhteesta. Muuntosuhde voidaan laskea kaavalla 5, joka pätee ideaalimuuntajamallille, mutta joka käytännössä antaa kuitenkin riittävän tarkkoja tuloksia käytännön muuntajille (Silvonen 2004). Koska virranmuunnin perustuu muuttuvan magneettikentän aiheuttamaan induktioon, niin tähän teknologiaan perustuva sensori pystyy mittaamaan ainoastaan vaihtovirtaa, sillä tasavirralla magneettikentän muutoksia ei tapahdu virran ollessa vakio (Ziegler ym. 2009).

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (5)$$

jossa

N_1 = ensiökierrosten lukumäärä

N_2 = toisiokierrosten lukumäärä

U_1 = ensiöjännite, V

U_2 = toisiojännite, V

I_1 = ensiövirta, A

I_2 = toisiovirta, A

Virranmuunnin siis muuntaa ensiöpiirissä kulkevan virran tietyllä muuntosuhteella toisiopiiriin kulkevaksi virraksi. Tähän teknologiaan perustuva virtasensori koostuu virranmuuntimesta ja toisiopiiriin kytketystä shunttivastuksesta, jonka jännitehäviö on verrannollinen ensiöpiirin virtaan (Ziegler ym. 2009). Käytännössä tällaisen virtasensorin edut ovat: pienet tehohäviöt, yksinkertainen rakenne, sähköinen eristys mitattavasta piiristä ja jänniteulostulo, joka ei tarvitse vahvistusta. Mittaustarkkuus virranmuunninta käyttävälle sensorille on 0,1 - 1 % välillä (Ziegler ym. 2009).

2.4 Viljan punnitusmenetelmiä kuivurissa

Viljamassan punnitsemiseen kuivurilla on tavallisesti käytetty kuivurin tai siilon alle asennettavia vaaka-antureita. Näiden antureiden tarkkuus on suhteellisen hyvä n. 0,05% nimelliskapasiteetista ja kapasiteetit vaihtelevat 2,5 - 30 tonnin välillä (Utilcell 2018). Antureita voidaan asentaa esim. 4 kpl, jolloin jokaisen siilon reunan alle tulee yksi anturi ja kokonaiskapasiteetti on nelinkertainen yhteen anturiin verrattuna. Anturit voidaan asentaa uuden siilon tai kuivurin rakennusvaiheessa, mutta myös jälkiasennus on mahdollinen. Jälkiasennus vaatii jonkin verran työtä, sillä anturit pitää pystyä sijoittamaan kantavien jalkojen alle. Kuivuriin tai siiloon asennettava vaakapaketti, joka sisältää näytön, neljä 10 tonnin anturia ja tarvikkeet maksavat 1990 € sisältäen 24 % arvonlisäveron (Hankkija 2018).

Viljan massavirran mittaaminen on ollut tutkimuksen kohteena jo pitkään, johtuen sen hyödyllisyydestä täsmäviljelyssä (He ym. 2016). Puimureihin on mahdollista asentaa erilaisiin

teknologioihin perustuvia viljan massavirtaa mittaavia sensoreita, joiden perusteella esimerkiksi satokartoitus on mahdollista (He ym. 2016). Sensorit voivat perustua voiman, tilavuuden, painon tai röntgensäteiden mittaukseen (He ym. 2016).

Painoon perustuvia massavirran mittausmenetelmiä löytyy kaupallisina tuotteina. Massavirtausta mittaava Dyna Instrumentsin (2018) valmistama DYNAchute on soveltuva viljan virtauksen mittaamiseen. DYNAchute on toiminnaltaan samantapainen, kuin hihnan alla oleva vaaka-anturi. Se mittaa läpi kulkevan viljan nopeutta samalla punniten sitä, jonka jälkeen massavirran määrittäminen on mahdollista. DYNAchutea on saatavilla kahdessa eri koossa ja valmistaja ilmoittaa laitteiden tarkkuudeksi alle 1 % mitatusta arvosta ja mitausalueiksi 0,1 - 20 t/h sekä 2,5 - 50 t/h (Dyna Instruments 2018).

2.5 Arduino Uno mittausinstrumenttina

Arduino on avoimeen laitteistoon perustuva elektroniikka alusta. Tässä työssä käytetään Arduino Uno Rev3 mikrokontrollerialustaa, joka on ATmega328P mikrokontrolleriin perustuva (Arduino 2018). Arduino Unon tärkeimmät ominaisuudet on koottu taulukkoon 1. Arduino Unon ohjelmointi ja ohjelmien lataaminen mikrokontrollerille on hyvin suoraan arduinolle kehitetyllä ohjelmointikielellä ja Arduino IDE-ohjelmointiympäristöllä (Arduino 2018).

Taulukko 1. Arduino Uno Rev3 mikrokontrollerialustan ominaisuudet (Arduino 2018).

Arduino Uno Rev 3	
Mikrokontrolleri	AT-mega328P
A/D-muunnin	10-bit
Toimintajännite	5 V
Syöttöjännite	7–12 V
Digitaaliset I/O pinnit	14
Analoginen sisääntulo pinnit	6
Flash muisti	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Kellotaajuus	16 MHz
Pituus	68,6 mm
Leveys	53,4 mm
Paino	25 g

Arduino Unon käyttämässä ATmega328P mikrokontrollerissa on sisäänrakennettu 10-bittinen A/D-muunnin (Arduino 2018). Tämä A/D-muunnin saa arvoja väliltä 0-V_{cc}, jossa V_{cc} on mikrokontrollerille syötetty jännitereferenssi, joka on Arduino Unolla 5V (Microchip Technology 2018). A/D-muuntimen absoluuttinen tarkkuus on +2 LSB (vähiten merkitsevä bitti) ja maksimi näytteenottotaajuus 10-bitin resoluutiolla on 15 000 näytettä sekunnissa (Microchip Technology 2018). A/D-muuntimen digitaalinen ulostulo saadaan kaavasta 6 (Microchip Technology 2018). Arduino Unon suurimmaksi näytteenottotaajuudeksi ilmoitetaan n. 10 000 näytettä sekunnissa (Arduino 2018).

Kaavasta 6 nähdään, että jännitereferenssin tarkkuus vaikuttaa suoraan A/D-muuntimelta saatavaan ulostuloon. Arduino Unossa on mahdollista käyttää virtalähteenä USB-portin syöttämää virtaa tai vaihtoehtoisesti ulkoista jännitelähdettä. Ulkoista jännitelähdettä käytettäessä jännitteensäätö on toteutettu ON Semiconductorin valmistamalla NCP1117 jännitteensäätimellä (Arduino 2018). Tämän jännitteensäätimen absoluuttiseksi tarkkuudeksi ilmoitetaan ±1 % ja pitkäaikaiseksi vakaudeksi 0,3 % (ON Semiconductor 2018).

$$ADC = \frac{V_{IN} * 1024}{V_{REF}}, \quad (6)$$

jossa

ADC = A/D muuntimen digitaalinen tulos

V_{IN} = mitattava jännite, V

V_{REF} = jännitereferenssi, V

3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tämän työn tavoitteena oli tutkia, onko viljan massavirtauksen reaaliaikainen mittaaminen elevaattorin virrankulutuksen perusteella mahdollista, rakentaa elevaattorille asennettava edullinen mikrokontrolleriin perustuva viljan massavirtauksen mittauslaitteisto ja testata sen toimivuutta. Tutkimus suoritettiin Helsingin yliopiston Viikin opetus- ja tutkimustilan viljankuivaamolla.

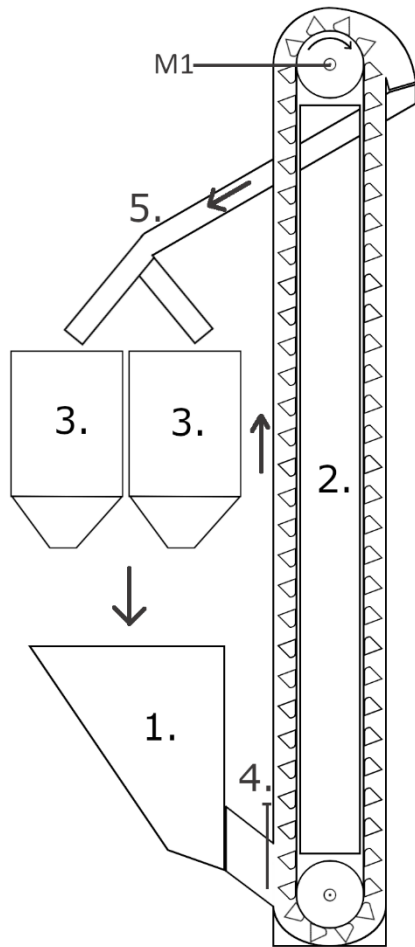
4 AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1 Viikin opetus- ja tutkimustilan viljankuivaamo

Kaikki elevaattorikokeet suoritettiin 2018 syksyllä Viikin opetus- ja tutkimustilan viljankuivaamon tiloissa. Viljankuivaamolla oli kaatosuppilon yhteydessä Antti-Teollisuuden valmistama 18,1 metriä korkea elevaattori, jota pyörittää 7,5 kW:n sähkömoottori. Sähkömoottorin käynnistys oli toteutettu tähti-kolmio-kytkennällä kuivurin sähkökeskuksessa. Kaikki elevaattorikokeet tehtiin kaatosuppilon yhteydessä olevalla elevaattorilla, syöttämällä viljaa elevaattorin nousupuolelle. Kuivaamolta löytyy myös Dinamica Generalen valmistama Dina 3-ajoneuvovaaka, jolla punnittiin elevaattorissa kierrätettyjä koe-eriä.

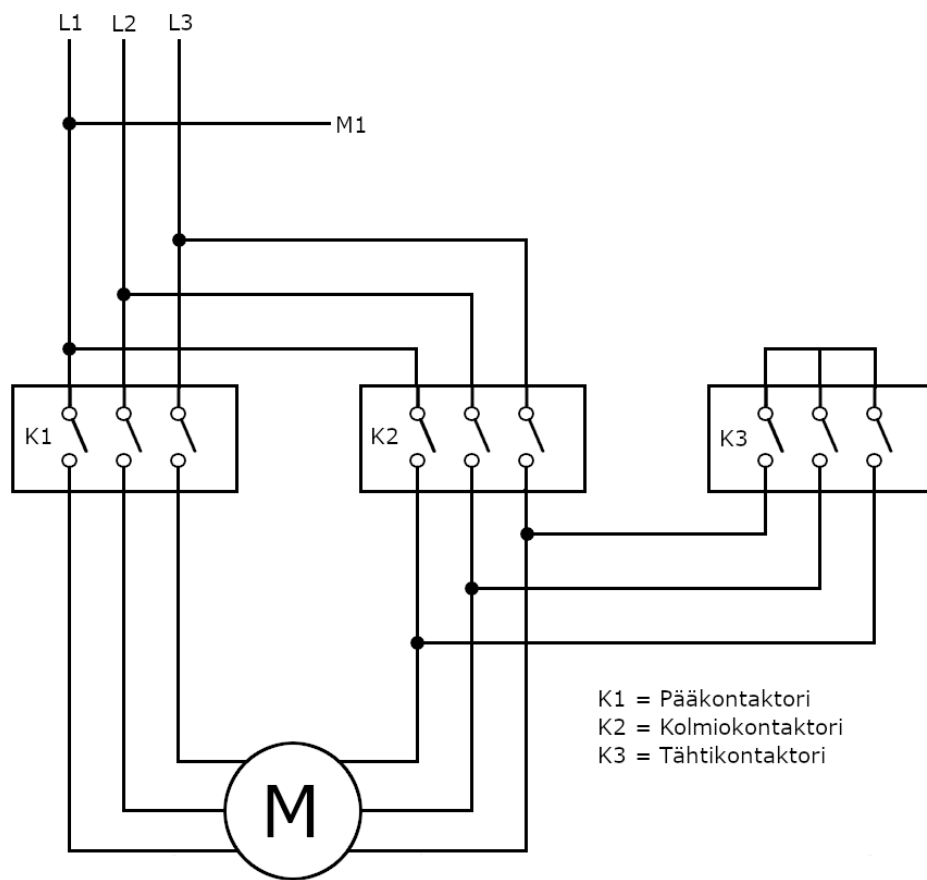
4.1.1 Koejärjestely

Koejärjestely on esitetty kuvassa 4. Elevaattorikokeet suoritettiin kierrättämällä koe-erää, joka oli etukäteen mitattu kuivaamolta löytyvällä ajoneuvovaa'alla ja siirretty kaatosuppiloon. Koe-erä siirrettiin kaatosuppilosta kokonaisuutena varastosiilon. Siirtokokeissa viljaa siirrettiin aina kahden varastosiilon välillä siten, että koe-erä siirrettiin aina kokonaisuudessaan siilosta toiseen. Samalla mitattiin elevaattorin sähkömoottorin virrankulutus ja siirtoon kuluva aika. Koe-erinä käytettiin viljankuivaamolla ennestään kuivattua ja lajittelematonta ohraa (*Hordeum vulgare*). Viljan massavirtausta koe-erän siirtokertojen välillä säädeltiin kaatosuppilon luukun avaamalla.



Kuva 4. Tutkimuksen koejärjestely. 1. Kaatosuppilo, 2. elevaattori, 3. varastosiihot 4. kaa-
tosuppilon luukku, 5. viljanjakaja, M1 virranmittaus. Viljan kulkureitit merkitty kuvaan
nuolilla.

Virranmittaus suoritettiin kuivurin sähkökaapilla, jonne oli helppo kytkeä virtapihdit ele-
vaattorille kulkevan johtimen ympärille. Kuvassa 5 on kuvattu elevaattorin sähkömoot-
torin vaatima tähti-kolmio käynnistys kytkentä, sekä mittauspiste (M1), johon virtapihdit
kiinnitettiin. Kuvassa 6 on vasemmalla virtapihtien kiinnitys sähkökaapin sisällä ja oike-
alla yläpuolella Fluken 123 Industrial Scopemeter, sekä alapuolella tutkimuksessa kehi-
telty mittalaitteisto. Virtapihtejä oli käytössä kaksi kappaletta, joista toinen oli kytketty
varsinaiseen mittalaitteistoon ja toinen Fluken 123 Industrial Scopemeteriin. Fluken mit-
tarin tuloksia ei tallennettu, mutta mittausten aikana Fluken mittarin ja tutkimuksen mit-
talaitteiston arvoja verrattiin keskenään varmistamaan mittalaitteiston toimivuus. Silmä-
määräisesti arvioituna molempien mittareiden hetkittäiset arvot olivat lähellä toisiaan,
eikä kehitetyssä mittalaitteistossa havaittu virheitä kuivurilla suoritettujen mittausten ai-
kana.



Kuva 5. Sähkömoottorin (M) kytkentä ja virranmittauspiste M1.



Kuva 6. Virtapihtien kiinnitys vasemmalla ja oikealla ylhäällä Fluken 123 Industrial Scopemeter ja oikealla alapuolella tutkimuksessa kehitelty mittalaitteisto.

Tässä työssä päätettiin mitata ainoastaan elevaattorin sähkömoottorin yhden vaiheen virrankulutusta ja muodostaa yhtälö massavirtaukselle yhden vaiheen virrankulutuksen funktiona. Tässä tapauksessa massavirran määrittäminen tapahtui siis mittaamalla virrankulutus koe-erän siirron aikana ja vaihtelemalla siirtonopeutta kaatosuppilon luukun avaamalla eri siirtokertojen välillä. Yhden siirtokerran aikana kaatosuppilon luukun avauma pidettiin vakiona ja siirtoon kuluva aika mitattiin. Koe-erän painon ja siirtoajan avulla määritettiin keskimääräinen massavirtaus kaikille siirtokerroille erikseen. Mittauksia suoritettiin Viikin opetus- ja tutkimustilan viljankuivaamolla 27.9.2018, 17.10.2018 ja 7.11.2018. Mittaukset suoritti Aleksi Järvenpää ja mittauksissa tarvittujen viljan koeerien punnitsemisessa avusti Karri Kauppinen.

4.1.2 Elevaattorin ominaisuudet

Kokeissa käytetty elevaattori oli Antti-Teollisuuden valmistama. Elevaattorin korkeudeksi mitattiin 18,1 metriä ja voimanlähteenä toimi 7,5 kW:n sähkömoottori. Voiman siirto ja nopeuden vähennys elevaattorin ylemmälle hihnapyörälle oli toteutettu neljän

kiilahihnan avulla. Syksyllä 7.11.2018 suoritettussa siirtokokeessa saavutettu maksimiteho tälle elevaattorille oli n. 50 tn/h. Massavirtauksen kontrollointia varten kaatosupin luokkuun piirrettiin tasot 1 - 13, jolloin luukun avauma vaihteli kokeissa välillä 100 - 473 mm.

Elevaattorin käyttämä teho kuluu pääosin pelkästään viljan siirtoon (Srivastava 2006). Aiemmin tehdyissä tutkimuksissa elevaattorin tehonkulutuksen ja massavirtauksen on havaittu korreloivan lineaarisesti, mutta hyötysuhteen määrittäminen on hankalaa. Vaikka viljan massavirtauksen ja vaaditun tehon yhteys on teoriassa täysin lineaarinen, niin käytännössä ongelmia aiheuttaa elevaattorin voimanlähteenä käytetty sähkömoottori, jonka hyötysuhde ja tehokerroin vaihtelevat kuormituksen mukaan (Gustafson ja Morgan 2004). Tämän takia sähkömoottorin tehonmittaukseen perustuva massavirtausmittari tarvitsisi aina todelliseen massavirtaukseen perustuvat kalibrointimittaukset koko tehoalueella.

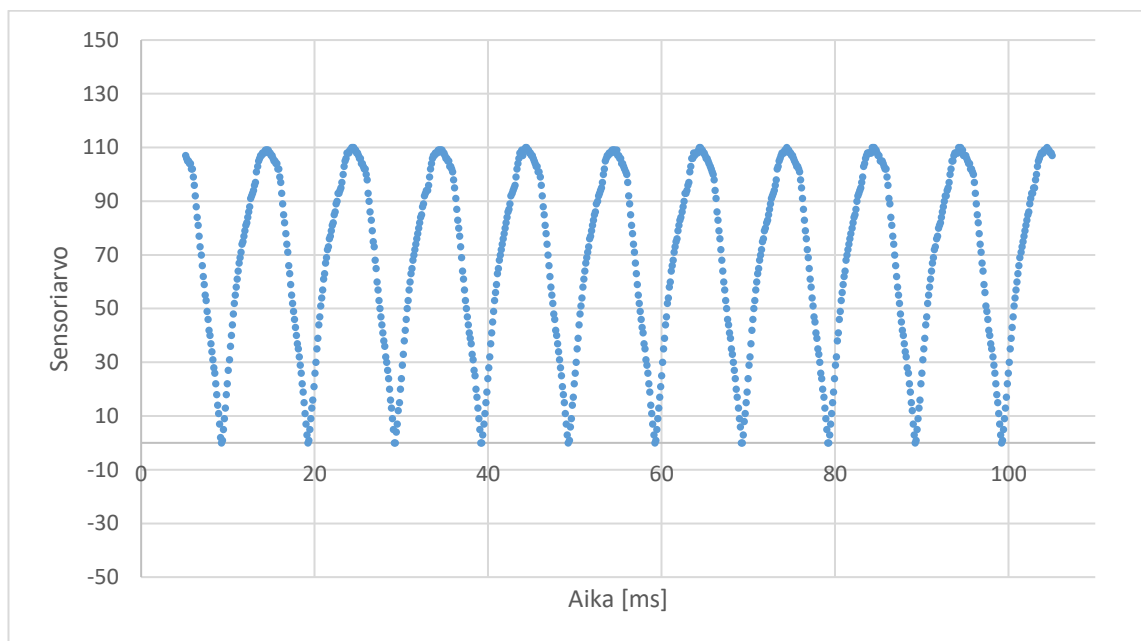
4.2 Virtapihdit

Tutkimuksen virranmittauksessa käytettiin Chauvin Arnouxin valmistamia MINI 09-virtapihtejä. Virtapihtien ominaisuudet on lueteltu taulukossa 2 (Chauvin Arnoux 2018). Ensiopiirin mitattavan virran tarkkuudeksi valmistaja on ilmoittanut 4 - 10 % $\pm 0,2A$, riippuen virran suuruudesta. Pienimmäksi kaistanleveydeksi ilmoitetaan 48 Hz, joten Suomessa tyypillisesti toimiva 50 Hz vaihtovirta on mitattavissa. Virtapihtien ulostulo on tasajännitettä, joka on suhteellinen ensiopiirin virtaan suhteella 100 mVDC / A AC. Tämä jänniteulostulo on hyvin mitattavissa Arduino Unolla, joten virtapihdit soveltuvat mitauslaitteistoon.

Taulukko 2. Chauvin Arnoux MINI 09 Virtapihdin ominaisuuksia (Chauvin Arnoux 2018).

Tyyppi	Chauvin Arnoux MINI 09
Vaihtovirta	1 A...150 A
Kaistanleveys	48 - 500 Hz
Tarkkuus 1 A...5 A	$\leq 10\% + 0,2 A$
Tarkkuus 5 A...15 A	$\leq 6\% + 0,2 A$
Tarkkuus 15 A...40 A	$\leq 3\% + 0,2 A$
Tarkkuus 40 A...150 A	$\leq 4\%$
Ulostulo signaali	100 mV DC /A AC

Kuvassa 7 on esitetty työssä rakennetulla mittauslaitteistolla tallennettua mittausdataa virtapihdeiltä. Tallennettu mittausdata on saatu mittaamalla 800 W leivänpaahtimen virrankulutusta ja samalla testaamalla mittalaitteiston kykyä tallentaa virtapihdeiltä tulevaa dataa. Mittausdata tallennettiin 26.8.2018. Kuvasta voidaan laskea, että aaltomuodon taajuus on 100 Hz, eli virtapihtien ulostulo on muunnettu 50 Hz vaihtojännitteestä tasajännitteeksi tasasuuntaussillalla. Tästä johtuen jänniteulostulosta täytyy ottaa useita näytteitä nopealla näytteenottotaajuudella, jotta voidaan tallentaa virtapihtien ulostulo signaalin aaltomuoto.



Kuva 7. Mittalaitteiston tallentamaa dataa.

4.3 Mittalaitteisto

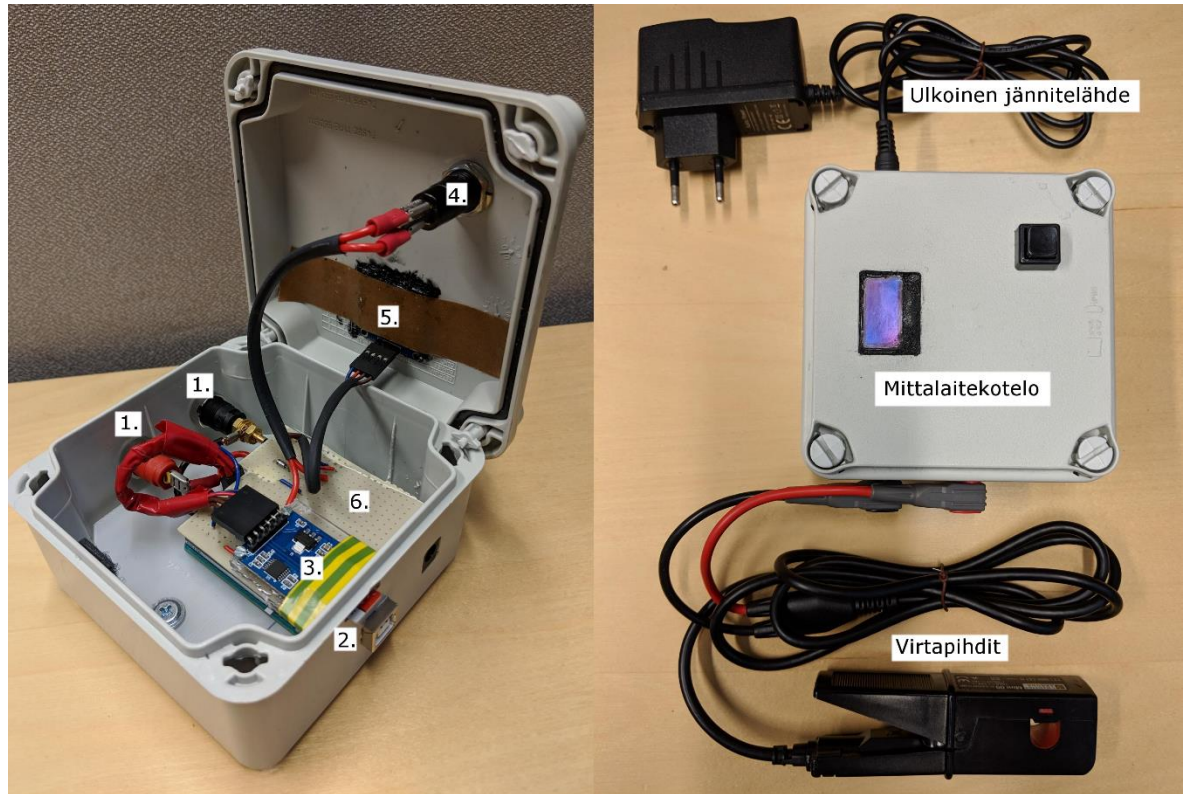
Mittalaitteistosta rakennettiin helposti kuivurille tuotava ja kytkettävä. Laitteisto koostuu Arduino Unosta, näytöstä, ulkoisesta jännitelähteestä, virtapihdeistä ja muistikortista. Koko laitteisto on rakennettu pölyltä suojattuun koteloon (kuva 8). Arduino Uno on liitetty näytöllä näkyvissä mittauksen aikana tiedot ajasta, virrasta, massavirtauksesta, siirrettävästä massasta, tiedostojen määrästä muistikortilla ja tieto siitä, onko laite tallentamassa

dataa muistikortille vai ei. Koteloon rakennetulla napilla voidaan aloittaa tai lopettaa datan tallentaminen muistikortille.

Elevaattorin siirtokokeiden aikana kuivurilla tarvitaan vain kuvassa 8 näkyvä mittalaitteisto. Eri siirtokokeet voidaan tallentaa muistikortille numeroituina CSV-tiedostoina, joista data voidaan myöhemmin lukea tietokoneella. Tiedostoon tallentuu tieto ajasta tallennuksen alettua, virrasta, A/D-muuntimen ulostulosta, siirtotehosta ja siirretystä massasta. CSV-tiedostojen koko on mittauksissa käytetyn muistikortin kokoon, 32 Gt, suhteutettuna hyvin pieni, n. 10 - 200 kt, joten varsinaista käytännön rajoitusta yhdellä kertaa suoritetuille mittauksille ei ole.

Arduinon 10-bittisen A/D-muuntimen digitaalinen ulostulo saa enintään 1024 eri arvoa. Vaikka virtapihtien mittausalue on 1 - 150 A, arduinon analoginen sisääntulo on korkeintaan 5 V, joten mittausalueena käytettiin 0 - 50 A. Täten A/D-muuntimen yksittäisen mittauksen resoluutio oli 0,0488 A. Mittalaitteiston vaatima näytteenottotaajuus ja sisäinen

tarkkuus testattiin kuivurilla 27.9.2018 mittaamalla elevaattorin tyhjäkäyntivirtaa ja käyttämällä mittalaitteistolle useita eri näytteenottotaajuuksia, alipäästösuodatinta ja vertailemalla saatuja tuloksia keskenään (kuva 10).

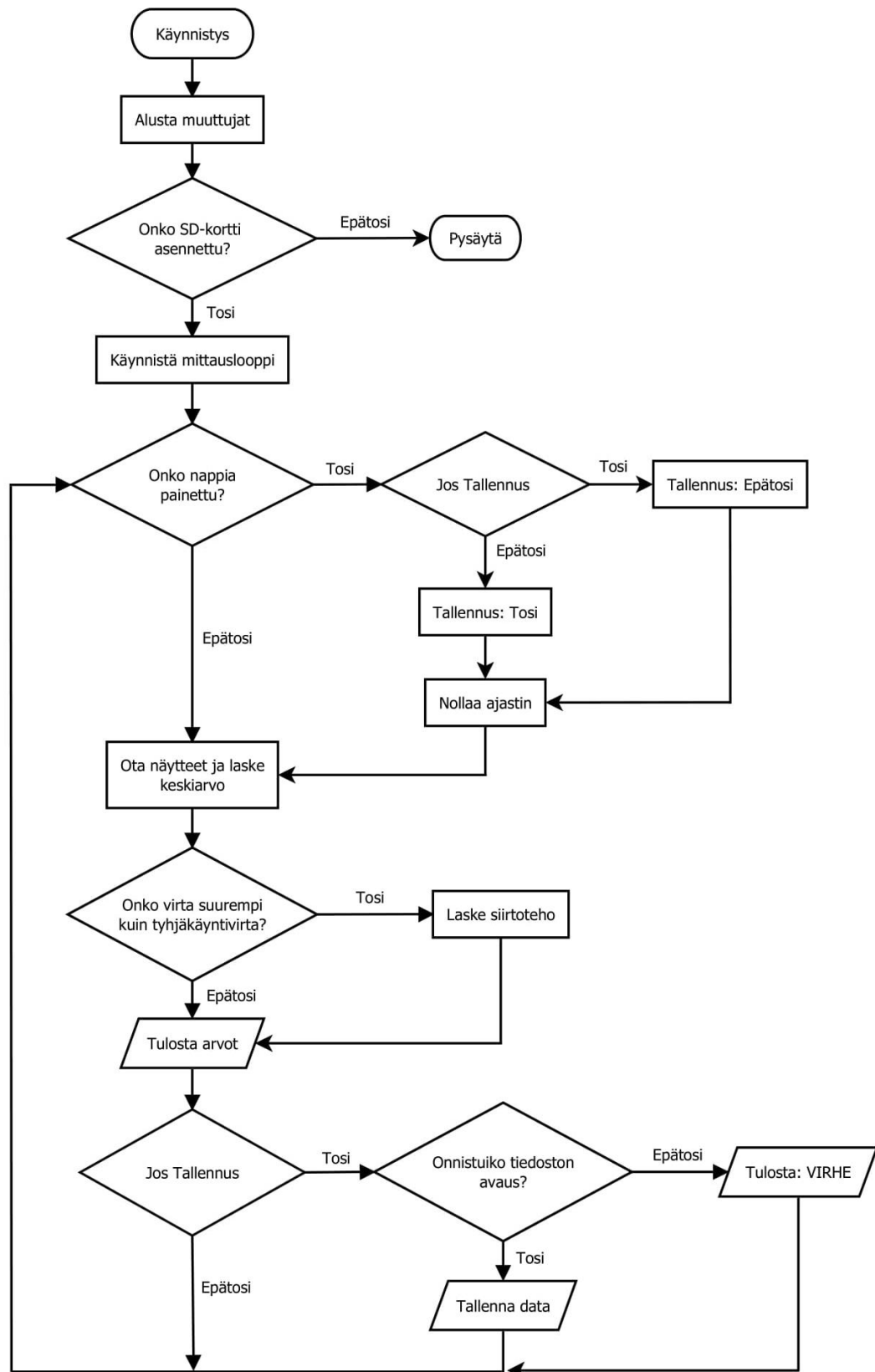


Kuva 8. Massavirtauksen mittalaitteisto kuvassa oikealla. Vasemmalla puolella kuva mittalaitetekotelon sisältä. 1. Virtapihtien sisääntulot, 2. muistikortti, 3. muistikortinlukija, 4. tallennusnappi, 5. näyttö, 6. piirilevy, jonka alla Arduino Uno.

4.4 Arduinon ohjelmointi

Arduinon A/D-muunnin kykenee ottamaan n. 10 000 näyttöä sekunnissa. Kuvassa 9 on esitetty mittalaitteistoon ohjelmoitu lopullinen koodi ja sen toimintaperiaate. Arduino ohjelmoitiin tallentamaan tuloksia ja päivittämään näyttöä 200 ms välein eli 5 Hz taajuudella. Yhden 200 ms syklin aikana Arduino ohjelmoitiin ottamaan 893 lukemaa A/D-muuntimelta, joista laskettiin keskiarvo ja lukema muutettiin virraksi ja edelleen kuivurilla 7.11 suoritettujen mittausten jälkeen määritetyllä yhtälöllä massavirraksi. Yhtälö on esitetty myöhemmin tulokset kappaleessa. Keskiarvon laskeminen toimii yksinkertaisena digitaalisena häiriösuotimena ja siirretyn massan arvo laskettiin massavirrasta ajan suhteen integroimalla. Koska virtapihdeiltä tuleva jännitesignaali oli tasasuunnattua 100 Hz taajuisista sinimuotoista aaltoa, näytteenottotaajuuksia määritettiin siten, että näytteenotto

kesti tarkalleen 100 ms, jolloin näytteiden otto aloitettiin ja lopetettiin samaan vaiheeseen aaltomuotoa. Tämä oli tärkeää, sillä virran tehollista arvoa laskettaessa olisi tulos vääristynyt, jos tehollista arvoa ei olisi laskettu täysistä aaltomuodoista. Kuvassa 9 kuvattu mittauslooppi, joka alkaa ”käynnistä mittauslooppi” kohdan jälkeen, käydään 200 ms välein uudestaan läpi, eli lopullinen näytteenottotaajuus oli 4465 Hz. Kuvassa 7 on esitetty yhden mittausloopin aikana tallennettu data, jossa näytteiden otto alkoi ajassa 5 ms ja loppui ajassa 105 ms, eli yhden mittausloopin aikana näytteen otto kesti 100 ms, sinimuotoinen tasasuunnattu aaltomuoto oli erotettavissa ja mittaustapahtuman aloitus ja lopetus tapahtui samassa vaiheessa aaltomuotoa.



Kuva 9. Tutkimuksessa kehitetyn mittalaitteiston koodi yksinkertaistettuna vuokaaviona.

4.6 Tutkimuksessa tehdyt kokeet

Tutkimuksessa mittalaitteistoa kehitettiin ja testattiin kuivurilla useita kertoja. Kaikilla mittauskerroilla oli erilaiset tavoitteet ja pääasiassa kokeet suoritettiin 27.9.2018, 17.10.2018 ja 7.11.2018. Muita satunnaisia testejä suoritettiin myös ennen 27.9., mutta tässä vaiheessa laitteisto oli vielä keskeneräinen.

Ensimmäisellä varsinaisella mittauskerralla 27.9. oli mittalaitteisto jo rakennettu jo kuvassa 8 näkyvään mittalaitetekoteloon, mutta jännitelähteenä toimi tietokoneen USB-portti ja mittalaitteiston tulokset tallentuivat tietokoneelle reaaliajassa suoraan Microsoft Exceliin. Tässä vaiheessa mittalaitteistossa ei vielä ollut muistikortinlukijaa asennettuna ja käyttö vaati vierelleen tietokoneen. Tällä mittauskerralla tavoitteena oli tutkia näytteenottotaajuuden ja analogisen alipäästösuodattimen vaikutusta virranmittauksen tarkkuuteen.

Elevaattoria käytettiin tyhjäkäynnillä ja Fluken 123 Scopemeterillä tarkistettiin silmämääräisesti, että virta pysyi pääasiassa tasaisena koko mittauksen ajan. Mittalaitteistoa testattiin 5 - 5000 Hz näytteenottotaajuuksilla. Yhden mittauksen aikana elevaattori pyöri tyhjiällä ja tyhjäkäyntivirtaa mitattiin 60 sekunnin ajan. Mittauksen aikana tallennetuista näytteistä laskettiin keskihajonta. Mittauksia tehtiin yhteensä 10 kappaletta, 5 kappaletta ilman alipäästösuodatinta ja 5 kappaletta alipäästösuodattimen kanssa. Tallennettu data käsiteltiin Microsoft Excelillä.

Toisella mittauskerralla 17.10. mittalaitteistoon lisättiin ulkoinen jännitelähde sekä muistikortinlukija ja näytteenottotaajuutena käytettiin 4465 Hz. Tällä kerralla tavoitteena oli tutkia mittalaitteiston yleistä toimivuutta, tallentaa tuloksia viljan siirrosta kuivurilla ja tutkia olisiko elevaattorin läpi kulkevan massavirtauksen määrittäminen mahdollista pelkän virranmittauksen perusteella. Koejärjestelyt olivat kuvan 4 mukaiset. Data tallentui muistikortille, josta se myöhemmin luettiin tietokoneella ja datan käsittely tehtiin Microsoft Excelillä.

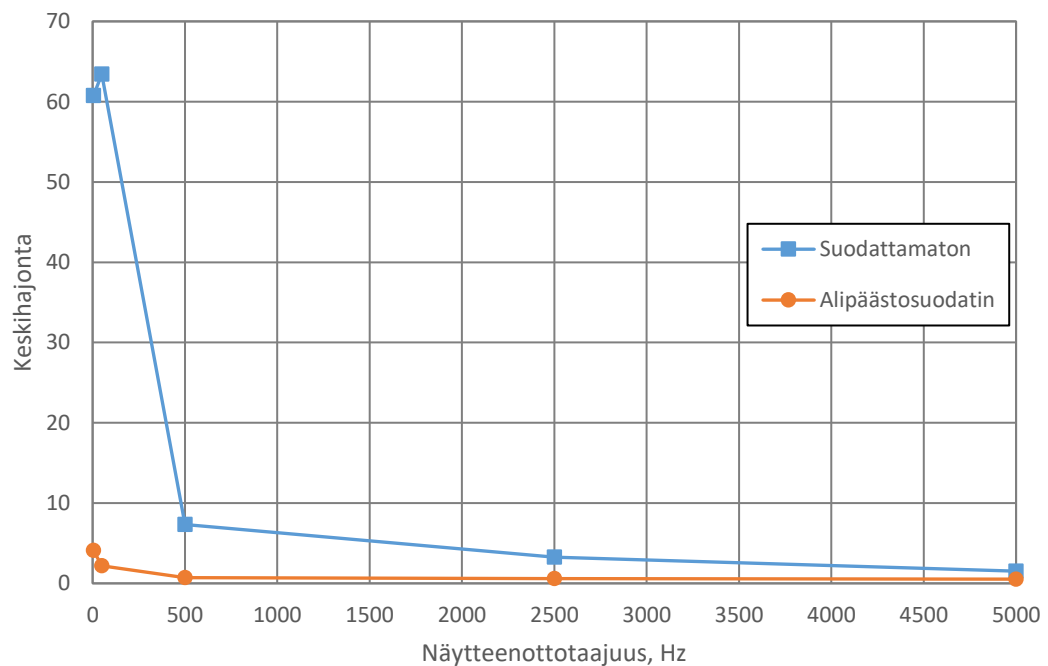
Kolmannella mittauskerralla 7.11. mittalaitteisto oli kehitetty loppuun asti. Mittalaitteisto oli havaittu edellisellä mittauskerralla toimivaksi ja kykeneväksi tallentamaan virranmittausdataa ja laskemaan tästä reaaliajassa elevaattorin siirtotehon ja siirretyn massan käy-

tetyn ajan perusteella. Tällä kerralla oli tavoitteena kalibroida mittalaitteisto useilla testimittauksilla ja sovittaa testimittauksiin yhtälö siirtotehosta virrankulutuksen funktiona. Mittausdata käsiteltiin jälkeenpäin Microsoft Excelillä.

5 TULOKSET

5.1 Mittalaitteiston näytteenottotaajuus ja sisäinen tarkkuus

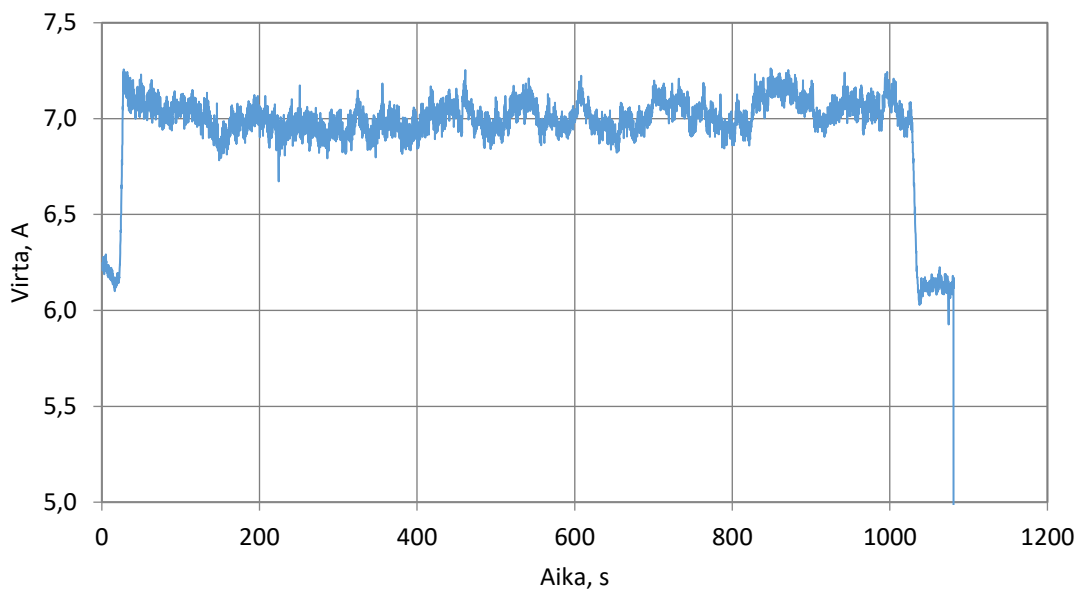
Mittalaitteiston vaatima näytteenottotaajuus ja sisäinen tarkkuus selvitettiin kuivurilla mittaamalla elevaattorin tyhjäkäyntivirtaa 27.9.2018. Alipäästösuodattimen kautta viety signaali oli suodattamatonta signaalia selvästi parempi keskihajonnaltaan (kuva 10). Suodattimen käyttö pienensi virranmittauksen keskihajontaa, kuten myös näytteenottotaajuuden kasvattaminen.



Kuva 10. Virtapihdeiltä mitattu suodattamattoman signaalin ja alipäästösuodattimen kautta viedyn signaalin keskihajonnat eri näytteenottotaajuuksilla.

5.2 Koemittaus kuivurilla 17.10.2018

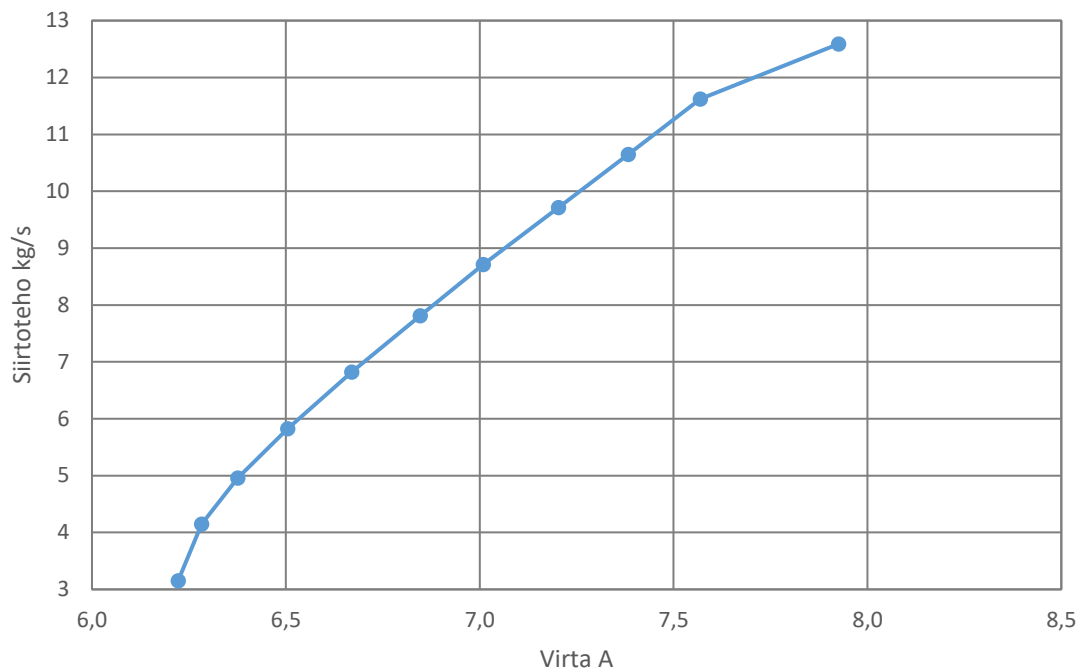
Alkuvalmisteluina koe-eräksi punnittiin kuivaamon ajoneuvovaa'alla peräkärriyn 8785 kg koetilalla puitua ja kuivattua lajittelematonta ohraa, joka siirrettiin kaatosuppiloon siirtoa odottamaan. Koejärjestely oli kuvan 4 mukainen. Kaikki siirtokokeet tehtiin syöttämällä viljaa elevaattorin nostopuolelle. Viljan massavirtauksen määrää säädeltiin kaatosuppilon luukun avaumalla. Siirtokokeita tehtiin 11 kertaa, joka kerta lisäämällä luukun avaumaa. Kuvassa 11 on esitetty yhden mittauskerran tallennettu data, josta voidaan havaita, että virrankulutus nousi selvästi ajassa 24 s ja täten viljan siirto alkoi. Viljan siirto päättyi ajassa 1032 s. Ajassa 0 - 23 s ja ajasta 1032 s eteenpäin on myös havaittavissa, että tyhjäkäyntivirta on n. 6,2 - 6,3 A. Lopussa virta tippuu voimakkaasti, kun elevaattorin sähkömoottori kytketään pois päältä. Siirtoteho määritettiin jälkeenpäin laskemalla datasta siirtoon kulunut aika ja tälle ajalle keskiarvo virrankulutuksesta.



Kuva 11. Yhden mittauskerran aikana tallennettu data elevaattorin sähkömoottorin virrankulutuksesta.

Kun luukun avauma oli pieni, siirtoteho 3,15 - 4,96 kg/s, tyhjäkäyntivirta ja siirron aikana käytetty virta olivat lähellä toisiaan. Tällöin siirtotehon laskeminen mittalaitteistolle oli hyvin hankalaa, sillä tyhjäkäyntivirran ja siirron aikana käytetyn virran välillä ei ollut selvää eroa. Siirtotehon ollessa välillä 5,83 - 12,59 kg/s tyhjäkäyntivirran ja aktiivisen siirron aikana käytetyn virran välinen ero oli riittävän suuri, n. 0,2 A, jolloin mittalaitteisto pystyi määrittämään siirtotehon laskemalla tehon ainoastaan arvoista, jotka olivat tyhjäkäyntivirran vaihteluvälin, n. 6,2 - 6,3 A, yläpuolella. Kaikista tehdyistä mittauksista

määritettiin siirtoteho virrankulutuksen funktiona. Siirtotehon funktiosta nähdään (kuva 12), että pienillä siirtotehoilla, 3 kg/s – 5 kg/s, virta ei juurikaan vaihtelee merkittävästi.



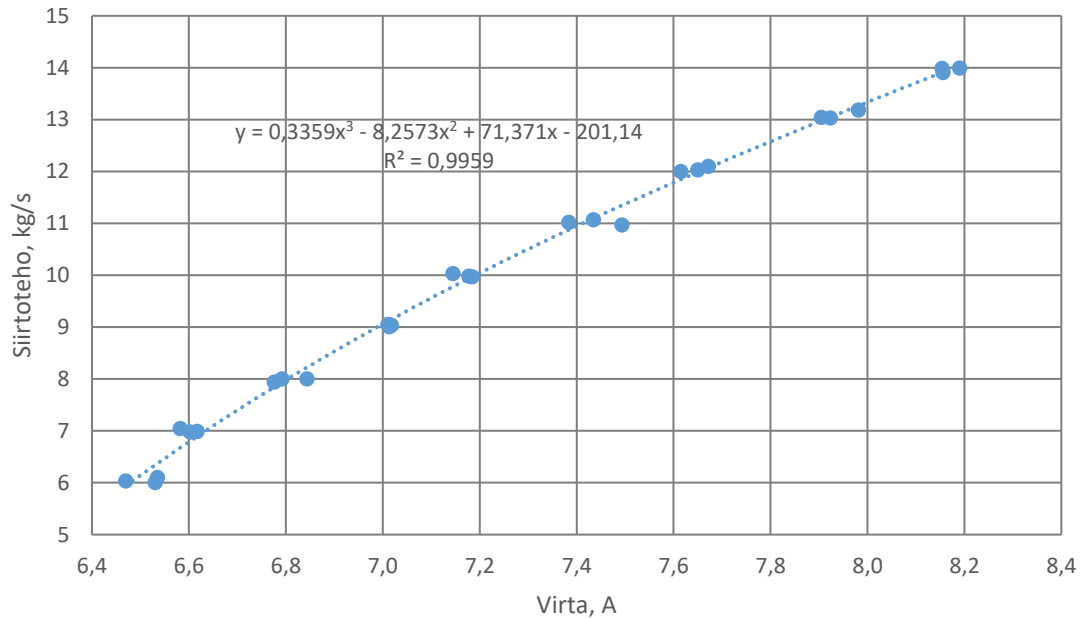
Kuva 12. 17.10.2018 toteutetut mittaukset (11 kpl) koottuna, jossa viljan siirtoteho on esitetty elevaattorin sähkömoottorin käyttämän virran funktiona. PILKUT akselien otsikon ja laadun väliltä puuttuvat

5.3 Koemittaukset kuivurilla 7.-8.11.2018

Koemittauksen järjestely oli kuvan 4 mukainen. Kaikissa siirtokokeissa vilja syötettiin elevaattorin nostupuolelle. Ohraa punnittiin kaatosuppiloon ajoneuvovaa’alla 7165 kg. Massavirtausta säädeltiin muuttamalla luukun avaumaa, mutta kuitenkin siten, että pienin siirtoteho oli 6 kg/s, johtuen edellisellä mittauskerralla todetusta hankaluudesta mitata tätä pienempiä siirtotehoja. Mittauksia suoritettiin yhdeksällä eri luukun avaumalla, teke-mällä kolme toistoa jokaisessa kohdassa. Yhteensä tallennettuja mittauskertoja oli 27. Jännitettä mitattiin Fluken 123 Industrial Scopemeterin avulla ja sen havaittiin pysyttelevän välillä 231 - 234 V.

Mittausaineiston käsittelyyn kirjoitettiin Microsoft Excelille VBA-pohjainen makro. Makrolla määritettiin jokaiselle siirtokerralle siirtoon kulunut kokonaisaika, siirtoteho sekä keskiarvovirta siirron aikana. Siirtoaika määritettiin laskemalla aika, jona sähkö-

moottorin virrankulutus ylitti tyhjäkäyntivirran. Tyhjäkäyntivirran kynnyksarvona käytettiin 6,35 A. Kaikkien mittauskertojen siirtotehot laskettiin erikseen ja eriteltiin keskimääräisen virrankulutuksen mukaan (kuva 13).



Kuva 13. 7.-8.11.2018 toteutetut mittaukset koottuna, jossa siirtoteho on esitetty elevaattorin sähkömoottorin käyttämän virran funktiona.

Excelillä määritettiin siirtoteholle funktio (kuva 13). Funktio oli kolmannen asteen funktio ja sen selitysaste R^2 oli 0,9959. Taulukossa 3 on esitetty mittaustulokset funktion määrittämistä varten eli keskiarvovirta ja siirtoteho eri kaatosuppilon luukun avaumilla. Taulukossa on myös laskettu siirretylle massalle arvot siirtotehon funktiota integroimalla ajan suhteen ja näille massoille suhteelliset virheet verrattuna alkuperäiseen viljamassaan. Siirtotehot vaihtelivat välillä 6,00 – 13,99 kg/s.

Taulukko 3. Siirretty massa laskettuna siirtotehon funktiosta integroimalla siirretyn ajan suhteen ja virheen osuus. Suhteellinen virhe laskettuna alkuperäisestä viljamäärästä.

Avauma [mm]	Virta [A]	Teho [kg/s]	Siirretty [kg]	Virhe [%]
193	6,53	6,10	7443	3,9
193	6,53	6,00	7445	3,9
193	6,47	6,03	6565	8,4
225	6,62	6,99	7066	1,4
225	6,60	6,98	6988	2,5
225	6,58	7,04	6666	7,0
254	6,78	7,94	7064	1,4
254	6,79	8,00	7106	0,8
254	6,84	8,00	7365	2,8
286	7,01	9,01	7255	1,3
286	7,02	9,03	7256	1,3
286	7,01	9,05	7215	0,7
317	7,18	9,98	7131	0,5
317	7,14	10,03	6981	2,6
317	7,18	9,97	7163	0,0
348	7,49	10,97	7407	3,4
348	7,43	11,07	7180	0,2
348	7,38	11,02	7070	1,3
379	7,65	12,03	7135	0,4
379	7,62	12,00	7069	1,3
379	7,67	12,10	7143	0,3
410	7,92	13,03	7174	0,1
410	7,98	13,19	7204	0,5
410	7,90	13,04	7125	0,6
442	8,15	13,98	7126	0,5
442	8,16	13,91	7168	0,0
442	8,19	13,99	7190	0,3

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Mittalaitteiston sisäinen ja ulkoinen tarkkuus

Mittauksia tehdessä kuivurilla virtaa mitattiin myös Fluken 123 Industrial Scopemeter avulla ja verrattaessa Fluken ja tutkimuksessa kehitetyn mittalaitteiston arvoja keskenään silmämääräisesti olivat ne lähellä toisiaan. Mittalaitteiston ulkoinen tarkkuus ei kuitenkaan ollut tässä työssä merkittävässä roolissa, sillä massavirtauksen funktio vaatii aina kalibroinnin, koska elevaattorin todellisuudessa käyttämää sähkövirtaa on hankala arvioida tarpeeksi tarkasti teoreettisesti, johtuen elevaattorin tehonkulutukseen liittyvistä epävarmuustekijöistä (Srivastava 2006). Tästä johtuen mittalaitteistolta vaadittiin ainoastaan hyvää sisäistä tarkkuutta. Hetkellinen virrankulutus määritettiin laskemalla virtapihtien signaaliulostulosta otettujen näytteiden keskiarvo, joka todellisuudessa on kuitenkin virran tehollisarvoa pienempi (Silvonen 2004).

Mittalaitteiston sisäistä tarkkuutta testattiin laskemalla mittalaitteiston tallentamien mittauspisteiden keskihajontaa eri näytteenottotaajuuksilla (kuva 10). Mittausten keskihajontaa pystyttiin pienentämään merkittävästi kasvattamalla näytteenottotaajuutta. Analogisen alipäästösuodattimen lisääminen virtapihtien signaalisääntulojen (kuva 8) väliin pienensi mittalaitteiston tallentamien mittauspisteiden keskihajontaa merkittävästi, etenkin pienillä, 5 - 500 Hz, näytteenottotaajuuksilla. Tämän lisäksi näytteenottotaajuuden kasvattaminen pienensi mittausten keskihajontaa entisestään. Tulosten perusteella näytteenottotaajuutena on perusteltua käyttää suurinta mittalaitteen mahdollistamaa arvoa. Suurella näytteenottotaajuudella ja alipäästösuodatinta käyttämällä mittalaitteen sisäinen tarkkuus oli riittävän hyvä tutkimuksen tarpeisiin.

6.2 Mittausten virhetekijät

7.-8.11.2018 toteutetuissa mittauksissa päästiin lopuksi suhteellisen hyvään tarkkuuteen: suhteellinen virhe verrattuna alkuperäiseen viljamassaan vaihteli välillä 0,0 - 8,4 %. Siirtotehoilla 6,00 - 7,04 kg/s mittauksissa oli havaittavissa suuria virheitä, 1,4 - 8,4 % (taulukko 3). Tämä johtui osittain siitä, että siirron aikana elevaattorin virta laski hetkittäin alle 6,35 A, joka oli määritelty 7.-8.11.2018 suoritettujen mittausten perusteella siirtotehon laskemisen raja-arvoksi. Pienillä virroilla myös sähkömoottorin tehokerroin ja hyö-

tysuhde vaihtelevat suhteellisen paljon verrattuna vaihteluihin lähellä moottorin nimellisvirtaa (Gustafson ja Morgan 2004), mikä osaltaan saattoi aiheuttaa epävarmuutta mittaus-tuloksiin siirtotehoilla 6,00 - 7,04 kg/s.

Virranmittaus toteutettiin ainoastaan yhdestä vaiheesta. Todennäköisesti parempi metodi olisi mitata sähkömoottorin tehoa, jolloin useat sähkömoottoriin ja jännitteenvaihteluihin liittyvät epävarmuustekijät tulisi huomioitua (Silvonen 2004). Arduinolla jännitteen, virran ja näiden vaihe-eron mittaaminen kolmesta eri vaiheesta olisi kuitenkin ollut virtapihdeillä ja jännitemittareilla suhteellisen hankalaa, johtuen vaihe-eron mittaamisen vaatimasta tarkasta ajastuksesta ja siitä, että jokaiselle vaiheelle tarvittaisiin kaksi sensoria: yksi jännitteen ja yksi virran mittaukseen. Tämä olisi myös huomattavasti kalliimpaa verrattuna yksinkertaiseen virranmittaukseen yhdestä vaiheesta. Työn tavoitteena oli ainoastaan selvittää virranmittauksen soveltuvuutta reaaliaikaisen massavirtauksen määrittämiseen, joten virranmittaus yhdestä vaiheesta oli tähän työhön soveltuva menetelmä. Jännite pysyi 7.-8.11.2018 suoritettujen siirtotestien aikana tasaisena, joten sen vaikutus lasket-tujen siirtotehojen virheisiin oli pieni.

Siirtokokeissa määriteltiin siirtoteholle keskiarvo koko siirtotapahtuman ajalle ja samalla metodilla määriteltiin virralle keskiarvo. Parempi metodi olisi ehkä ollut, jos siirrettyä viljaa olisi voitu punnita siirron aikana tarkasti, jolloin siirtoteho olisi pystytty määrittämään reaaliajassa ja virrankulutusta sekä siirtotehoa olisi pystytty vertailemaan jatkuvasti. Viljan massavirtausta mittaavalla laitteella työssä kehitetyn mittalaitteiston kalib-rointi olisi myös ollut huomattavasti nopeampaa, kuin nyt käytetyllä menetelmällä, jossa massavirtaus määritettiin jälkeinpäin siirretyn massan ja siihen kuluneen ajan perusteella. Massavirtauksen mittaukseen olisi sopinut esimerkiksi Dyna Instrumentsin valmistama DYNACHUTE (Dyna Instruments 2019).

6.3 Mittalaitteiston käytettävyys kuivurilla

Siirtotestien perusteella tutkimuksessa kehitetyn mittalaitteiston hyödyntäminen viljan reaaliaikaisessa massavirtauksen määrittämisessä on mahdollista. Siirtotesteillä määriteltiin siirtoteholle funktio virrankulutuksen avulla. Siirretyn massan suhteellinen virhe vaihteli välillä 0,0 - 8,4 %. Siirtotehon vaihdellessa välillä 7,94 - 13,99 kg/s vaihteli suhteellinen virhe välillä 0,0 - 3,4 %. Ottaen huomioon mittalaitteiston yksinkertaisuuden ja helpon kytkettävyyden on mittalaitteistoa mahdollista käyttää kuivurilla edullisena viljavaakana.

Yksi mahdollinen käyttökohde työssä rakennetulle mittauslaitteistolle on viljankuivurin kierrätyksen aikaisen massavirtauksen mittaaminen. Peltolan (1997) kuivauskokeissa massavirtauksen havaittiin nousevan kuivausprosessin edetessä. Massavirtauksen nousu johtui jyvien kuivumisesta, hioutumisesta ja viljan puhdistumisesta (Peltola 1997). Peltolan (1997) mukaan viljan kierrätyksen massavirtauksen muutos heikentää kuivausprosessin hallittavuutta ja voi heikentää kuivauksen tehoa, mutta toisaalta myös lämpöaurioiden riski pienenee. Massavirtausta mittaamalla olisi siis mahdollista optimoida kuivausprosessia kuivauksen edetessä, jos kiertonopeutta säädettäisiin massavirtauksen mukaan.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää kuivurille asennettava elevaattorin läpi kulkevaa massavirtausta mittaava mittalaitteisto ja testata sen toimivuutta. Tutkimuksessa kehitettiin mittalaitteisto elevaattorin sähkömoottorin virran mittaamiseen yhdestä vaiheesta, joka laskee mitatusta virrasta siirtotehon ja siirretyn massan ja tallentaa datan muistikortille CSV-tiedostona.

Siirtotestien perusteella tutkimuksessa kehitetyn mittalaitteiston hyödyntäminen viljan reaaliaikaisessa massavirtauksen määrittämisessä on mahdollista. Siirtotesteillä määriteltiin siirtoteholle funktio virrankulutuksen avulla. Siirretyn massan suhteellinen virhe vaihteli välillä 0,0 - 8,4 %.

Mittalaitteiston tarkkuutta ja mittausväliä pystyttäisiin todennäköisesti kasvattamaan mittaamalla elevaattorin sähkömoottorin kuluttamaa tehoa ja muodostamalla massavirralla funktio tehon avulla. Mittalaitteiston kalibroinnille voi olla tarve tulevaisuudessa, jos elevaattorin voimansiirron hyötysuhde vaihtelee tai jos elevaattorissa tapahtuu muita virrankulutukseen vaikuttavia muutoksia, sillä virrankulutuksen muutokset vaikuttavat suoraan mittalaitteiston laskemaan siirtotehoon. Kalibrointiprosessia olisi mahdollista nopeuttaa käyttämällä kalibrointiin elevaattorista ulos tulevan viljan massavirtausta mittaavaa laitetta, jolloin virranmittaus voitaisiin kohdentaa massavirtaukselle reaaliajassa.

Tällä hetkellä tutkimuksessa kehitetty mittalaitteisto pystyy toimimaan yksinkertaisena kuivurivaakana sekä mahdollisesti massavirtausmittarina kuivauksen aikana. Laitteisto on yksinkertainen asentaa, edullinen, eikä vaadi sähköasentajaa. Kalibroinnin tarve on selvästi eniten aikaa vievä tekijä, johtuen sen vaatimista useista mittauksista eri siirtotehoilla, mutta kalibrointia olisi mahdollista nopeuttaa käyttämällä erillistä massavirtausta mittaavaa laitetta.

8 KIITOKSET

Haluan kiittää työtä ohjanneita professori Laura Alakukkoa ja tohtori Tapani Jokiniemeä. Haluan kiittää heitä myös VILKUTEK -hankkeen järjestelyistä ja Tapani Jokiniemeä tutkielman aiheen keksimisestä. Kiitokset hankkeen rahoittajalle Marjatta ja Eino Kollin säätiölle.

LÄHTEET

- Antti-Teollisuus. 2018. <https://antti-teollisuus.fi/materialbank/kuljettimet/>. Kuljettimet. Tulostettu 3.12.2018.
- Arduino. 2018. <https://www.arduino.cc/>. Arduino – introduction. Tulostettu 12.12.2018
- Bin Lu, T.G. 2006. A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications* 42(4): 924-933.
- Chauvin Arnoux 2018. https://catalog.chauvin-arnoux.com/fr_en/mini-09.html. MINI 09 miniature AC current clamp. Tulostettu 10.12.2018.
- DeLong, H. H. 1970. Vertical elevators on the farms. *Research Bulletins of the South Dakota Agricultural Experiment Station*. 576.
- Dyna Instruments. 2019. <https://www.dynainstruments.com/en/products/flow-rate-measurement-devices-all/dynachute.html>. Tulostettu 22.1.2019.
- Gustafson, R. J., & Morgan, M. T. 2004. Fundamentals of electricity for agriculture. 3. Paines. St. Joseph, MI. American Society of Agricultural Engineers. s. 15-17, s. 205-235.
- Hankkija. 2018. <https://www.hankkija.fi/Koneet/Tarvikkeet/sahkolaitteet-ja--tarvikkeet/kuivuri-siilovaaka-40tn/>. Tulostettu 12.11.2018.
- He, W., Jingtao, H., Lei, G., & Yanfeng, J. 2016. Development and optimization of a novel grain flow sensor based on PVDF piezoelectric film. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 9 (4). 141-150.
- Jaskulski, A. 2008. Engineer-to-order approach to high speed bucket elevator design in A small enterprise. *Applied Engineering in Agriculture* 24 (5). 545-557.
- Jokiniemi, T. 2016. Energy efficiency in grain preservation. *Helsingin yliopisto, maatalous-metsätieteellinen tiedekunta, maataloustieteiden laitos*.
- Kueck, J. D. 1998. Development of a method for estimating motor efficiency and analyzing motor condition (Conference Record of 1998 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, June, 21-26, 1998, Portland, USA). IEEE.
- Labiak, J. S., & Hines, R. E. 1999. Grains and grain quality. Teoksessa: *CIGR handbook of agricultural engineering*. St. Joseph, Michigan. American Society of Agricultural and Biological Engineers. s. 11-20.
- Microchip Technology. 2018. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>. Tulostettu 15.12.2018.

- Nord Gear Oy. 2018. https://www.nord.com/cms/fi/product_catalogue/geared_motors/parallel_shaft_geared_motors/pgop_parallel_shaft_geared_motors~1_1541.jsp. Unicas-tappivaihde. Tulostettu 8.12.2018.
- ON Semiconductor. 2018. <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NCP1117-D.PDF>. NCP1117: A positive LDO linear voltage regulator (fixed and adjustable). Tulostettu 16.12.2018.
- Peltola, A. 1997. Viljaa kierrättävän lämminilmauivurin säädöt: kuivausilman lämpötilan ja massavirtauksen sekä viljan kierrätyksen vaikutus viljaa kierrättävän sekavirtaustyypin lämminilmauivurin tehoon ja kuivauksen energiankulutukseen. Helsinki. Työtehoseuran julkaisuja 355.
- Rosentrater, K. A., & Williams, G. 2004. Design considerations for the construction and operation of grain elevator facilities. Part II: Process engineering considerations (ASAE/CSAE Annual International Meeting, August, 1-4, Ontario, Canada). St. Joseph, Michigan: ASAE.
- Silvonen, K. 2004. Sähkötekniikka ja elektroniikka. 2. painos. Helsinki: Otatieto. 511 s.
- Srivastava, A. K., Goering C. E., Rohrbach, R. P., Buckmaster, D. R. 2006. Conveying of Agricultural Materials. Teoksessa: Engineering principles of agricultural machines. 2. painos. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers. s. 491-524.
- Utilcell. 2018. <https://www.utilcell.es/en/loadcell/model-420/>. Model 420. Tulostettu 2.11.2018.
- Vakola. 1973. Antti 36-viljaelevaattori. Vakolan koetusselostus 836. Helsinki. Valtion Maatalouskoneiden Tutkimuslaitos.
- Vakola. 1974. Jaakko 70-viljaelevaattori. Vakolan koetusselostus 870. Helsinki. Valtion Maatalouskoneiden Tutkimuslaitos.
- WEG. 2016. <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/ha0/h5f/WEG-motors-specification-of-electric-motors-50039409-brochure-english-web.pdf>. Specification of electric motors. Tulostettu 9.1.2018.
- Ziegler, S., Woodward, R., Ho-Ching Iu, H., & Borle, L. 2009. Current sensing techniques: A review. IEEE Sensors Journal 9 (4): 354-376.